仕　様　書

1．件名　　ホールボディカウンタ用標準スペクトル解析ソフトウエアの開発

2．数量　　1式

3．目的　　国内で使用されている異なる仕様のホールボディカウンタに対して、統一的な手法によりスペクトル解析及び内部被ばく線量計算を行うためのソフトウエアを開発する。

4．納入時期　　平成25年3月15日（金）

5．仕様　　別添資料による

6．保証期間　　納入より1年間は、障害等に対する無償保証を行うこととする。

7．納品物及び提出図書

①作成したシステムの実行ファイル及びソースコード，取扱い説明書並びに試験成績書を収めた電子媒体（DVD又はCR-ROM）　1部

②作業工程表，作業実施体制表，及び契約締結後に発注者側との協議により決定した事項をまとめた議事録　1部

③取扱説明書　3部

④作業成果報告書　3部

8．納入場所：千葉県千葉市稲毛区穴川4-9-1　放射線医学総合研究所
緊急被ばく医療共同実験施設D-106室（内線372）

9．検査　　当研究所の検査職員が実施する納品物の仕様に関する検査の合格をもって納品完了とする。

部課名：　緊急被ばく医療研究センター被ばく線量評価部
使用者氏名：栗原　治

（別添資料）

ホールボディカウンタ用標準スペクトル解析ソフトウエアの開発

1. 件名　ホールボディカウンタ用標準スペクトル解析ソフトウエアの開発

2. 概要

2－1 目的

東京電力福島第一原子力発電所の事故によって環境中に放出された放射性物質による内部被ばくについては人々の関心が高く，全国各地の地方自治体や医療機関などでホールボディカウンタ（WBC）の導入が進められている。しかしながら，WBC による計測については国内での標準規格がなく，WBC が設置された場所のバックグラウンド放射線のレベルや設計仕様の違いにより，WBC 毎の測定精度のばらつきが予想される。一方，我が国での WBC の利用は，従前から原子力施設従業員の個人モニタリングにほぼ限定されており，それに特化した設計仕様の WBC では，上記のような一般公衆を対象とした測定には必ずしも適していない。また，導入された WBC の中には，今回の事故の主要核種となる放射性セシウムの定量が困難なものもある。こうした問題を解決するため，複数の製造元の WBC に共通して利用することが可能なスペクトル解析ソフトの開発を進める。なお，本件は，資源エネルギー庁からの委託事業である「平成 24 年度原子力災害影響調査等事業（ホールボディカウンタの校正等）」の一部として，放射線医学総合研究所（以下，放医研）が実施するものである。

2－2　納品物及び納品方法

① 作成したシステムの実行ファイル及びソースコード，取扱い説明書並びに試験成績書を収めた電子媒体（DVD 又は CR-ROM）
② 作成したシステムを発注者が指定した端末にインストールして動作確認
③ 作業工程表，作業実施体制表，及び契約締結後に発注者側との協議により決定した事項をまとめた議事録

2－3　納期

平成 25 年 3 月 15 日（金）

2－4　検収

発注者が指定したシステム専用機に構築し，担当者の立会いの下，所定の機能が適切に作動することの確認及び納入物品の精査を以って，検収とする。

2－5　納品先

当研究所（千葉市稲毛区穴川 4-9-1）内，緊急被ばく医療共同実験施設 D-106 室（内線 372）

3. 技術仕様

開発するソフトウエアは，複数の製造元の WBC から出力されるスペクトルデータ及びそのスペクトル解析

に必要な種々のデータを入力として，体内放射能量を出力とする（図 1）。詳細は以下に記述する通りである。

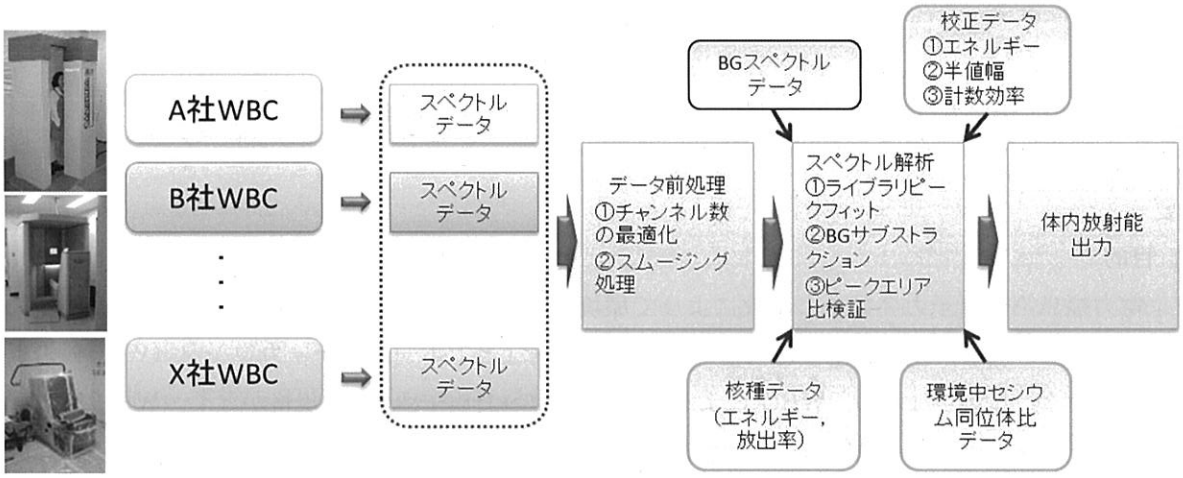

図 1　開発するソフトウエアの概要

3−1　ソフトウエアの処理

ソフトウエアの処理を図 2〜6 に示す。校正スペクトル処理(図 2)、BG スペクトル処理(図 3)、被検者スペクトル処理(図 4)を組み合わせて WBC のスペクトルを処理する。各処理ステップの仕様については表 1 に示す通りである。また，図 2,3,4 中のスペクトル解析（A）及び（B）の処理フローをそれぞれ図 5 及び図 6 に示す。

BG スペクトルの処理には該当する WBC の校正スペクトル処理、被検者スペクトルの処理には該当する WBC の校正スペクトルと BG スペクトル処理が前提となることに注意してソフトウエアを校正すること。

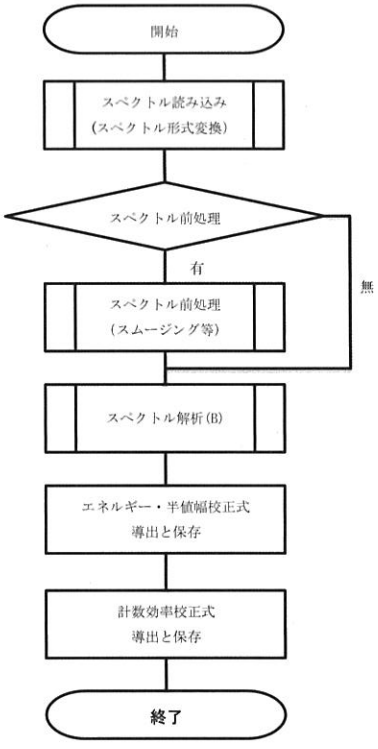

図 2　校正スペクトル処理フロー

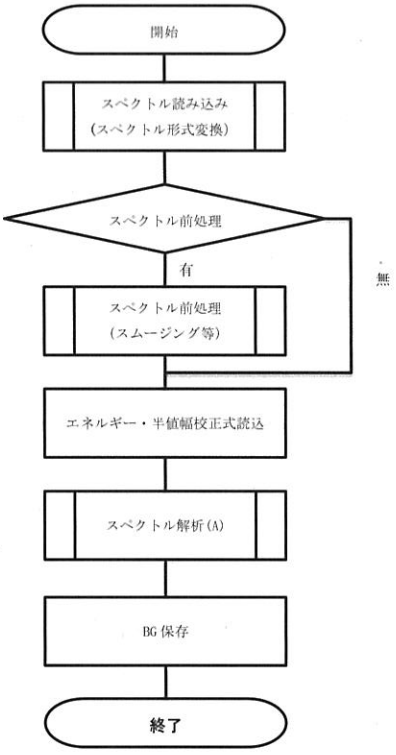

図 3　BG スペクトル処理フロー

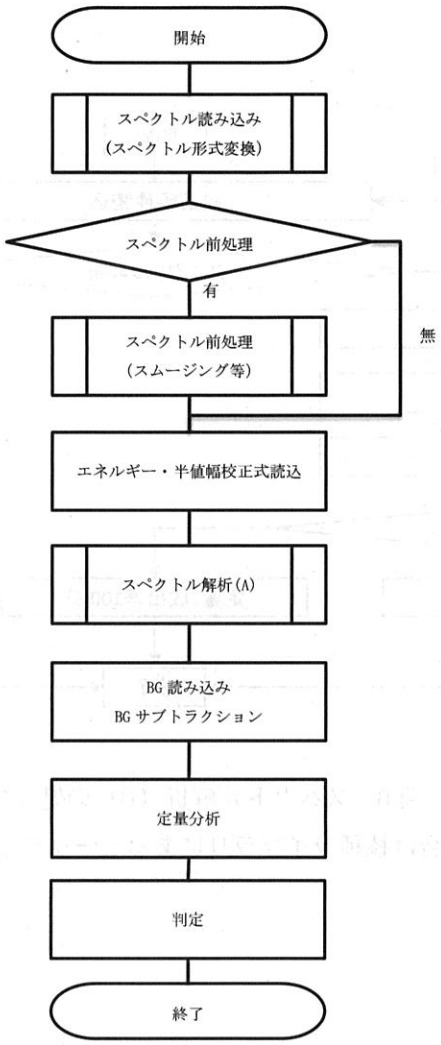

図 4　被検者スペクトル処理フロー

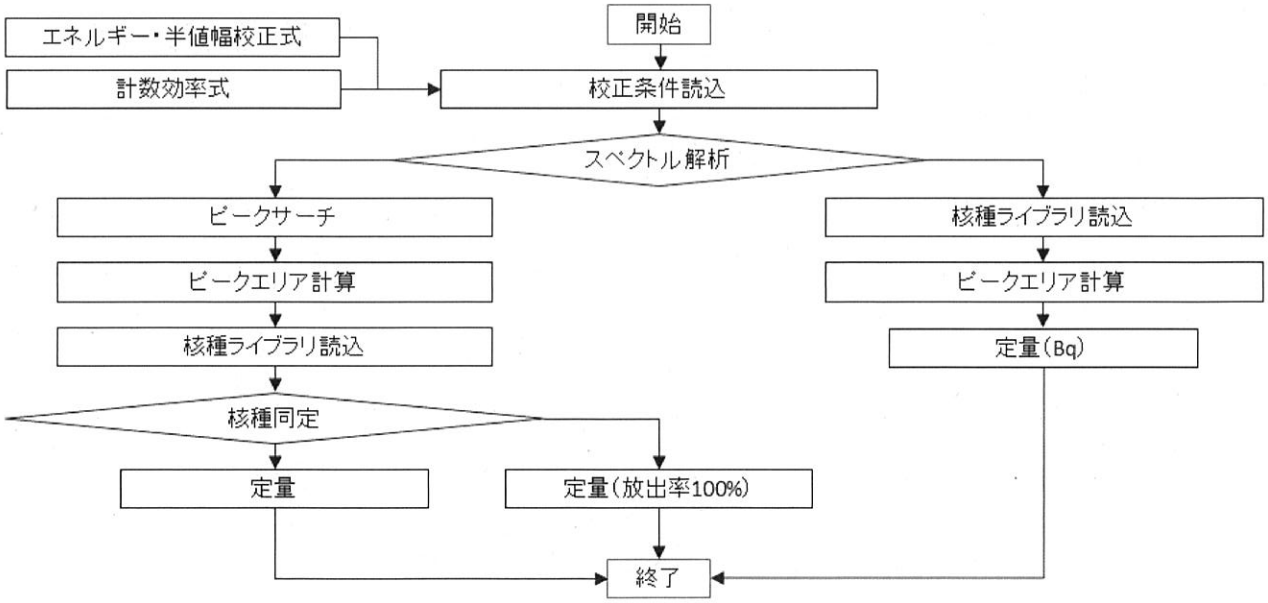

図 5　スペクトル解析（A）の処理フロー

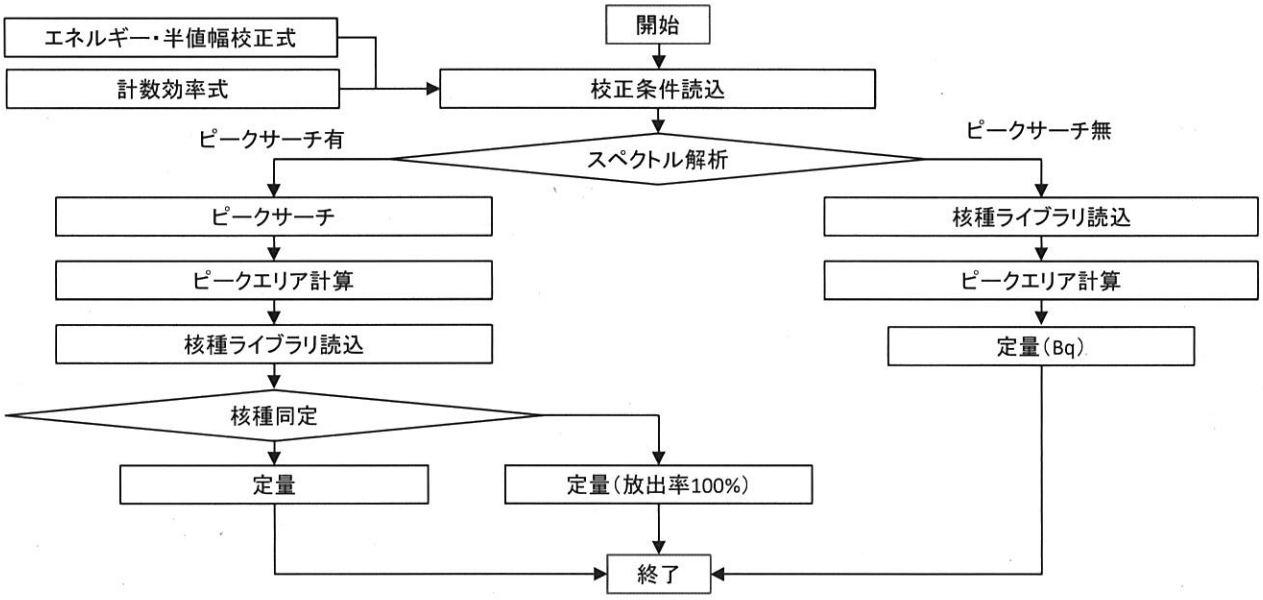

図 6　スペクトル解析（B）の処理フロー

（※ピークサーチ無の場合は核種ライブラリにあるピークラインのみのピークエリアを計算）

表 1　全体処理フロー中の各処理ステップの仕様（図 2,3,4 参照）

処理ステップ	仕様
スペクトルフォーマットを選択及びスペクトルの読込 スペクトル読み込み(スペクトル形式変換)	発注者が指定する WBC 製造元について，WBC からの出力されるスペクトルを読み込む。スペクトルデータのフォーマット形式（一部，バイナリのものが含まれる）については発注者から情報提供する。 発注者が指定するスペクトルを読み込む。WBC 製造元ごとに異なるフォーマットについて対応して続く処理が円滑にできるように形式の変換を行う。スペクトルデータのフォーマット形式（一部，バイナリのものが含まれる）については発注者から情報提供する。
スペクトル前処理 スムージング処理	スペクトルデータはチャンネル数が WBC 製造元によって異なるため，500ch 程度となるように処理する。また，隣り合うチャンネルのカウントの移動平均をとったスペクトルデータを生成する。これらの処理はユーザーが任意に選択できるものとする。
エネルギー・半値幅校正式読込	スペクトルの種類が BG または被検者（サンプル）である場合は，校正スペクトルの解析によって得られたエネルギー校正式及び半値幅校正式を読み込む。
スペクトル解析（A）	表 2 を参照
スペクトル解析（B）	表 2 を参照
BG サブトラクション	BG スペクトルの解析から得られたサーチドピークの情報（ピークエネルギー、ピークエネルギーから同定された核種、ピークエリア）を用い，被検者（サンプル）スペクトルの同様の解析から得られた同一核種のピークエリアから BG の寄与分を差し引く。
定量分析	校正スペクトルの解析から得られた計数効率曲線を用い，被検者（サンプル）スペクトルにおいて検出されたサーチドピークに該当する核種の体内放射能量を定量する。当該核種が複数のピークを有する場合には，個々のピーク毎に体内放射能量を計算し、ピークエリアの誤差の逆二乗で荷重した体内放射能量も算出する。
判定	定量分析の結果が妥当であるかの判定を行う。すなわち，現在環境中に存在する放射性同位元素の同位体比（主に、^{134}Cs と ^{137}Cs）に整合しているかを判定する。これらの処理はユーザーが任意に選択できるものとする。

表 2　スペクトル解析（A）処理フロー中の各処理ステップの仕様（図 5 参照）

処理ステップ	仕様
校正条件読込	エネルギー・半値幅校正式を読み込む。
ピークサーチ	参考図書に示された方法に準ずる。
ピークエリア計算	参考図書に示された方法に準じ，ピークエリア及びその統計誤差を計算する。
核種ライブラリ	定量を行う核種の情報を所定のファイルに格納し，スペクトル解析に用いる。ここで核種の情報とは，ピークエネルギー，放出率及び物理半減期のことである。

※図 3 に示すように，スペクトル解析の方法はピークサーチを行う方法と行わない方法の両方が可能とする。後者は，核種ライブラリに登録された核種のみに限定して，ピークサーチを行うことなく，該当するピークエネルギーの関心領域（Region Of Interest：ROI）にガウス関数適合（フィット）を行いピークエリアの計算を行う。BG スペクトル及び被検者スペクトルの両方について上記の解析を行えるものとして，体内放射能の定量の際には BG の寄与を差し引く。

表 3　スペクトル解析（B）処理フロー中各処理ステップの仕様（図 6 参照）

処理ステップ	仕様
スペクトル種類の選択	読み込んだスペクトルが，エネルギー校正用か計数効率用のいずれかの目的で取得されたかを選択する。
ピークサーチ	参考図書に示された方法に準ずる。
線源情報ファイル読込	校正に用いた線源（例えば，ホールボディカウンタ校正用ファントム）の核種情報を所定のファイルに保存し，それを読み込み以降のスペクトル解析に用いる。核種情報とは，ピークエネルギー，放出率及び物理半減期であり，物理半減期による補正により検定時の放射能量から物理半減期による補正を行い，計数効率の計算を行うものとする。
エネルギー校正式導出	参考図書に示された方法に準ずる。 ※エネルギー校正式は，光子エネルギーを変数とする所定の関数で与える。個々のサーチドピークのピークエネルギーに所定の関数を最小二乗法により適合することで求める。 ※導出した関数から求めたエネルギーの誤差を計算する。
エネルギー校正式読込	エネルギー校正式をスペクトルに反映し，以降の解析に用いる。
半値幅校正式導出	参考図書に示された方法に準ずる。 ※半値幅校正式は，光子エネルギーを変数とする所定の関数で与える。個々のサーチドピークの半値幅に所定の関数を最小二乗法により適合することで求める。 ※導出した関数から求めた半値幅の誤差を計算する。
半値幅校正式読込	半値幅校正式スペクトルに反映し，以降の解析に用いる。
ピークエリア計算	参考図書に示された方法に準じ，ピークエリア及びその統計誤差を計算する。
計数効率曲線導出	参考図書に示された方法に準ずる。 ※計数効率曲線は，光子エネルギーを変数とする所定の関数で与える。個々のサーチドピークの計数効率に所定の関数を最小二乗法により適合することで求める。なお，関数適合に用いる元データとなる計数効率は手動で入力することも可能とする。 ※導出した関数から求めた計数効率の誤差を計算する。

3−2　スペクトル解析

スペクトル解析における種々のパラメータの計算の一例を以下に記述する。なお，開発するソフトウエアでは，NaI(Tl)シンチレーション検出器のスペクトル解析に特化したものとする。

(1) ピークモデル

スペクトル上のピークはガウス関数に適合させる。

$$F_i = H \cdot Exp\left(-\frac{(x_i - c_p)^2}{2\sigma^2}\right)$$

ここで，F_iはチャンネル x_iにおけるピークモデル関数の値，Hはピーク高さ，c_pはピーク中心，σはガウス関数の幅である。ピーク下の連続部分を引いた後のピークの半値幅を FWHM と定義すると，σ=2.355×FWHM に近似できる。ガウス関数への適合は与えられたスペクトルに対する最小二乗法によ

り行う。

(2) エネルギー及び半値幅校正式

- エネルギー校正式を次式で与える。

$$E = C_0 + C_1 \cdot x + C_2 \cdot x^2 + \ldots$$

ここで，xはスペクトルのチャンネル，C_iはオフセット，ゲイン，非線形性を表す係数（2次係数以降）である。

エネルギー校正式の次数決定法については協議の上決定する。

- 半値幅校正式を次式で与える。

$$FWHM = F_0 + F_1\sqrt{E}$$

ここで，F_0とF_1は関数適合から得られたパラメータ

(3) ピーク効率計算

あるエネルギーEでのピーク効率 ε(E)を次式で与える。

$$\varepsilon(E) = \frac{S}{T_i \cdot y \cdot A \cdot K_w \cdot U_f}$$

ここで，Sは校正スペクトルのピーク面積，T_iは測定のライブタイム，yは当該ピークの核種の放出率，Aは校正日における線源強度，K_wは線源強度の減衰補正係数，U_fはBqへの単位変換に必要な係数である。

(4) 計数効率曲線

ピーク効率をエネルギーの関数として得るために，以下の多項式を参考にする。

$$Ln(\varepsilon) = \sum_{i=0}^{n} b_i \cdot (Ln(E))^i$$

ここで，b_iは個々のピーク効率の重み付けをした最小二乗近似によって求まる係数，εはエネルギーEでのピーク効率となる。ただし，多項式の最適な項数はピークポイント数によって決まる。

もう一つの代表的な多項式は次式である。

$$Log(\varepsilon) = \sum_{i=1}^{n} a_i \cdot \left(\frac{1}{E}\right)^i$$

ここで，a_iは個々のピーク効率の重み付けをした最小二乗近似によって求まる係数，εはエネルギーEでのピーク効率となる。ただし，多項式の最適な項数はピークポイント数によって決まる。ただし，この式ではクロスオーバー（計数効率曲線の極大部分）となるエネルギーを境にして二つの計数効率曲線を用意する必要がある。

(5) ピークサーチ

参考文献等に記載されるピークサーチ法の中で，発注者から提供されるスペクトルデータを解析して最適な方法を選定する。代表的なピークサーチ法は下記のとおりである。

- 二次微分法によるピークサーチ
- ライブラリに基づくピークサーチ（Peak Erosion 法）

(6) 検出限界値

検出限界値は検出限界放射能（Minimum Detectable Activity）として次式（Currie の式）で与える。

$$MDA = \frac{2.71 + 4.65\sqrt{B}}{\varepsilon \cdot T}$$ （※95%危険率の場合）

ここで，Bは当該ピーク関心領域におけるバックグラウンド計数，Tは計測時間となる。ただし，関心領域の幅はエネルギーの関数となる。

(7) ピーク面積の計算

- ピークフィットを行った場合

ピーク面積は次式で与えられる。

$$A = h \cdot Z\sqrt{\pi}$$

ここで，hは関数適合で得られたピーク高さ，Zはピーク幅。ガウス関数の幅をσとすれば，$Z^2 = 2\sigma^2$となる。

ピーク面積の誤差は次式で与えられる。

$$\sigma_{area} = \sqrt{\left(\frac{A}{h}\right)^2 \cdot {\sigma_h}^2 + \sum_i \left(\frac{f_i \cdot A_i}{h}\right)^2 \cdot {\sigma_{hi}}^2}$$

ここで，σ_hはhの誤差，A_iはi番目の妨害ピークの面積，σ_{hi}はその誤差，f_iはi番目の妨害ピークのうち，当該ピークに含まれる面積である。

- 関数適合を行わない場合

単一ピークのピーク面積は次式で与えられる。

$$S = G - B$$

ここで，Sはピーク面積，Gは関心領域のカウント数の合計，Bは連続領域。

Bは直線連続モデル，段差型連続モデルのそれぞれについて次式で与えられる。

$$B = \frac{N}{2n}\left(B_1 + B_2\right)$$ （直線連続モデル）

$$B = \sum_{i=1}^{N}\left(\frac{B_1}{n} + \frac{B_2 - B_1}{nG} \cdot \sum_{j=1}^{i} y_1\right)$$ （段差型連続モデル）

ここで，B_1，B_2はそれぞれピーク領域の連続領域のカウント合計となる。

単一ピークの誤差は次式で与えられる。

$$\sigma_{area} = \sqrt{\sigma_G{}^2 + \sigma_B{}^2}$$

なお，直線連続モデル，段差型連続モデルの概念を図７に示す。

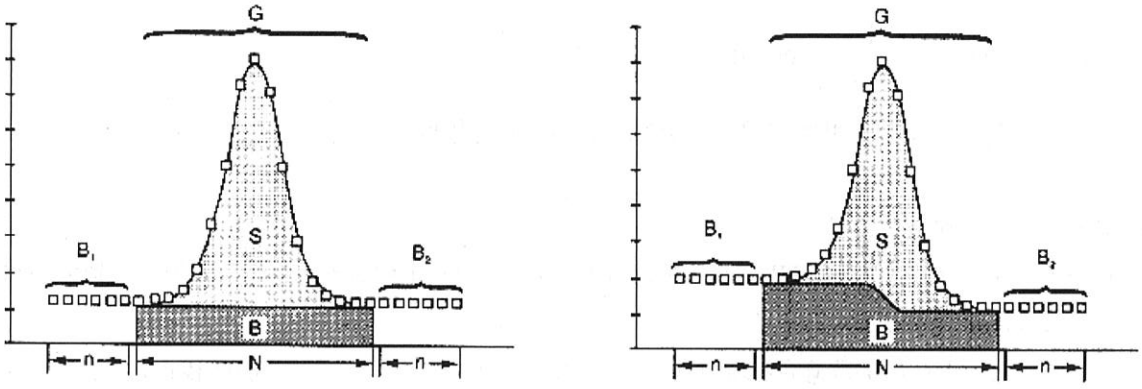

図７　ピーク下連続領域（左：直線連続モデル，右：段差型連続モデル）

- ピーク環境バックグラウンドの差引

  環境バックグラウンドに解析対象とするピークと同一のエネルギーのピークが存在する場合は次式によって正味のピークカウントを得る。

  $S = (G - B) - I$

  ここで，Iは解析ピークの連続領域にある環境バックグラウンドによるピーク成分である。

  T_s，T_bをそれぞれサンプル及び環境バックグラウンドのスペクトルのライブタイムとし，I_bを環境バックグラウンドによるピークの正味の面積とすると，上式は次式となる。

  $$S = R\left(G - \frac{N}{2n}(B_1 + B_2)\right) - \frac{T_S}{T_b} \cdot I_b$$

  ピークエリアの誤差は次式で与えられる。

  $$\sigma_S = \sqrt{\sigma_B{}^2 + \sigma_G{}^2 + \sigma_I{}^2}$$

スペクトル解析に係るその他の計算は，参考文献を参照のこと。

3－3　内部被ばく線量計算

定量した体内残留放射能から，内部被ばく線量を計算する機能を追加する。計算式は次式のとおりである。線量評価に用いる各種パラメータは，国際放射線防護委員会（ICRP）の刊行物等を参考にする。

- 急性摂取シナリオの場合

$$E = \frac{M}{R(T)} \cdot e(50)$$

ここで，Eは内部被ばく線量（預託実効線量），Mは体内残留放射能，$R(T)$は経過時間 Tの関数となる残留率，$e(50)$は摂取後 50 年間の預託線量係数。

- （均等）慢性摂取シナリオの場合

$$E = n \cdot m \cdot \sum_{n} \frac{1}{R(T-n)} \cdot e(50)$$

ここで，nは摂取期間（日数），mは 1 日当たりの摂取量となる。

3−4　ユーザーインターフェイス

ユーザーインターフェイスは GUI とし，項目 3-1「ソフトウェアの処理」に示した処理と機能を容易に実施できるように支援するものとする。

スペクトル，ピークへの関数適合状況（残差を含む），エネルギー校正式，半値幅校正式，計数効率曲線を表示し，核種ライブラリへの評価対象核種の追加登録，削除が任意に行えるようにすること。

ユーザーインターフェイスについては上記機能を満たしたうえで、利用しやすい GUI デザインを行うこと。そのため GUI の決定までに複数回の打ち合わせを放医研において実施する。

3−5　解析結果

スペクトル解析結果及び内部被ばく線量計算結果の主要な項目については，発注者との協議の上で，テキストファイルに出力可能とすること。

4.　読込み可能なスペクトル形式

以下の製造元のスペクトルフォーマットに対応する。

- 富士電機（拡張子.CHN）
- 日立アロカメディカル（拡張子.CHN，テキストフォーマット）
- 安西メディカル（テキストフォーマット）
- RADEC（テキストフォーマット）
- Canberra（拡張子.CNF または　テキストフォーマット）

5.　解析性能試験

「標準γ線スペクトル解析ソフト（本ソフト）」について各機能が正常に利用できること行えることを確認するほか、シミュレーションによるスペクトル解析の検出精度の確認を行う。

5-1. シミュレーションによるスペクトルデータの整備

ヒトの体内に全身に均一に分布する体内放射能を仮定し、ホールボディカウンタの検出器の応答関数を汎用放射線輸送計算コードによって求める。この計算を行うホールボディカウンタ（一式）は、構造及び材料など計算に必要な情報は、MCNP で読み込み可能なデータとして発注者側から提供する。

※応答関数とは、検出器に入射した放射線（光子）の検出内部の有感領域における物質との物理的相互作用をシミュレートし、イベント毎に有感領域におけるエネルギー沈着を計算したものを指定したエネルギービン毎にヒストグラム化したもの。実測のエネルギースペクトルとの比較が可能。

5-2. 検出性能の試験

前項で作成したスペクトルデータを本ソフトで読み込み、シミュレーションで計算条件において設定した体内放射能を再現性を検証し、妥当性を評価する。

6. ソフトウエア要件

開発するソフトウエアは，Windows®7 以降を OS とする PC 端末上で動作可能なこと。開発環境は特に指定はしないが，ソフトウエアの利用者がライセンス購入の必要のない構成で開発すること。オープンソースソフトウェアの採択に当たってはライセンス要件等にも留意すること。実際に採用するソフトウエア要件については、放医研への承諾を得た上で作業の実施を行うこと。

7. 情報セキュリティ要件

7－1　機密保持

本業務の一切（当研究所から開示された資料や情報を含む）について，秘密の保持に留意し，漏えい防止の責任を負う。

7－2　情報セキュリティ対策

(1) 受注者は，本業務の実施において情報セキュリティを確保するための体制を整備するとともに，情報漏えい等の情報セキュリティ侵害への対策を十分に講ずること。
(2) 受注者は，本業務に係る情報セキュリティ対策の履行状況について，発注者が報告を求めた場合には速やかに報告するとともに，情報セキュリティ対策について発注者が改善を求めた場合には，発注者と協議の上，合意した体制を実施すること。
(3) 受注者は，機密保持等及び情報セキュリティ対策の事項に違反した事実を認めた場合には速やかに発注者に報告するとともに，発注者の指示に従い必要な措置を講ずること。
(4) 本業務実施に当たっては，要員に対しては個人情報の取り扱いを含む情報セキュリティ教育を実施すること。

8. 検査要件

受注者は検査実施計画書を作成し，発注者の了承を得ること。なお，実施する検査項目には表 1 に示したシステム内の個々の処理ステップの仕様を満たすこと。GUI についても仕様書に定める内容の機能が行えること。

9. 瑕疵責任

受注者は，以下の瑕疵担保責任を負うものとする。瑕疵担保責任期間は当研究所の検収後 1 年間と

する。

- 受注者は，受注者は本業務にて納入する全ての納入成果物について，瑕疵担保責任を負う。
- 受注者は，納入成果物に瑕疵があった場合，納入成果物を修正の上，提出する。

10. 知的財産権

(1) 本業務の納入成果物の著作権は，検収が完了した時点で，当研究所に移転する。ただし，本業務実施以前に他で通常共通して使用されたもの，受注者がこの契約締結前から権利を有している著作権等を除く。

(2) 業務における成果物に第三者が権利を有する著作物が含まれる場合，受注者は当該著作物の使用に必要な費用負担や使用許諾契約に係る一切の手続きを行うこと。この場合は，事前に発注者に報告し，了承を得ること。なお、第三者との間に著作権に係る権利侵害の紛争が生じたときは，当該紛争の原因が自ら発注者の責に帰す場合を除き，受注者の責任，負担において一切を処理すること。

11. その他

(1) 受注者は，本件に係る作業において不明な点が生じたときは遅滞なく報告し，発注者と協議を行い，その決定に従うこと

(2) 受注者は，発注者の要求に応じて作業進捗状況を速やかに報告すること。

－以上－

参考文献

1) 米沢ら，実用ガンマ線測定ハンドブック，日刊工業社（2002）
2) 伊藤ら，放射化学分析ハンドブック，日本アイソトープ協会（2004）
3) 旧科学技術庁，放射能測定法シリーズ６　NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータ機器分析法（1974）

その他，発注者から提供される参考文献を参考にする。